

AZ ERUPTÍV FIATAL CSILLAGOK KÖZVETLEN KÖRNYEZETE

A doktori értekezés tézisei

Sipos Nikoletta

Fizika Doktori Iskola,
Részecskefizika és Csillagászat Doktori Program,
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

A Doktori Iskola vezetője: Prof. Csikor Ferenc
A Doktori Program vezetője: Prof. Csikor Ferenc

Témavezető:
Dr. Kun Mária (tudományos tanácsadó)

Külső konzulens:
Dr. Ábrahám Péter (tudományos tanácsadó, igazgató)



MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete
Budapest, 2011

Bevezetés

A kis tömegű csillagok a csillagközi anyag legsűrűbb területein, a molekuláris felhőmagokban születnek. A szülő molekulafelhőben kialakuló instabilitások a sűrű magok gravitációs összeomlásához vezetnek. Az összeomló felhőmag mélyén a kezdeti forgás következtében a protocsillag mellett kialakul egy kis méretű, forgó anyagbefogási (akkréciós) korong. A Nap-típusú csillagok anyaguk nagy részét egy ilyen akkréciós korongon keresztül gyűjtik be. Fejlődésük korai szakaszában a csillagok szoros kapcsolatban maradnak az környezetükkel, mely meghatározza a rendszer további fejlődését. Ez a környezet irányítja a csillag felépülését, és a későbbi bolygók is itt születnek.

A csillagtömeg felépülésének módja és időbeli lefolyása a csillagkeletkezés során alapvető fontosságú. A csillagfejlődés korai szakaszában az idő előrehaladtával az anyag egyre csökkenő ütemben érkezik a protoplanéaris korongról a csillag felszínére. Ezt a csökkenést azonban hirtelen, rövid időtartamú kitörések szakítják meg, ekkor a behulló anyag sokkal nagyobb ütemben zúdul a csillag felszínére. A 10^{-9} – 10^{-7} M_{\odot}/yr körüli tipikus nyugalmi akkréciós ráták ilyenkor rövid időszakokra több nagyságrenddel megemelkednek, és a csillag teljes anyagának a $\sim 10\%$ -át ezekben a gyors akkréciójú periódusokban gyűjti össze. Az FU Orionis- és EX Lupi-típusú jelenséget mutató változócsillagok (FUorok és EXorok, rendre) valószínűleg a legerőteljesebb ilyen jellegű kitöréseket jelzik. A kitöréseket váratlan, az optikai hullámhosszakon ~ 2 – 6 magnitúdós látványos kifényesedés jellemzi, mely változatos ideig marad fenn. A rövidebb, néhány hónapig–évig tartó, ismétlődő kitörések az EXorok sajátossága, a FUorok között azonban van olyan, amelyik már csaknem egy évszázada fényes, és a csoport minden tagjának kitörése évtizedek óta tart.

Az akkréció megszaladását valamilyen típusú instabilitás okozza, mely lehet termikus, gravitációs vagy mágneses eredetű, és a kitörés beindulása több forgatókönyv szerint is lejátszódhat. Bár a kitörések kiváltó okát pontosan nem ismerjük, és több magyarázat is elképzelhető, abban biztosak lehetünk, hogy bármely mechanizmus idézi is elő az anyag-behullás felgyorsulását, a csillagkörüli környezet, különösen annak a csillaghoz közeli tartománya fontos szerepet játszik a folyamatban. Ennek ellenére, doktori munkám kezdetén még igen kevés információnk volt az eruptív csillagokat körülvevő anyag szerkezetéről,

a benne található hőmérsékleti viszonyokról és a kitörések alatt a korong – burok rendszerben lejátszódó folyamatokról, különösen részletes modellezéssel alátámasztva. Ez a problémakör adta doktori kutatásom fő témáját. A kitörő fiatal csillagok csillagközi környezetének tulajdonságait vizsgáltam, mind nyugalmi, mind kitörésbeli állapotukban.

Célok

Az eruptív fiatal csillagok környezetének kutatása során két kérdéskört tanulmányoztam. Egyikük a források általános jelentőségét érinti, ehhez kapcsolódóan a következő kérdésekre kerestem választ: Vajon *minden* csillag keresztülmegy eruptív időszakokon a korai fejlődése során? A korongok melyik evolúciós fázisában jellemzőek a kitörések? Vannak olyan jellegzetességeik a kitöréseken kívül, melyek megkülönböztetnék őket a „normális” T Tauri csillagoktól? Összesen valamivel kevesebb mint 30 EXort/FUort ismerünk. Ennek ellenére az eruptív jelenséget nem nevezhetjük ritkának. Ha figyelembe vesszük, hogy a felfényesedések rövid időskálájúak, akkor statisztikai megfontolások alapján arra jutunk, minden kis tömegű csillag keresztülmehet eruptív fázisokon, sőt a kitöréseknek ismétlődniük kell. A statisztika mellett azonban az eruptív csillagok nyugalmi tulajdonságait is meg kell ismernünk, ha választ akarunk kapni az említett máig nyitott kérdésekre. Amennyiben a forrás a szokványos fiatal csillagoktól eltérő tulajdonságokat mutat, az arra utal, hogy a kitörések a csillagok csak egy alcsoportjának a fejlődésében tölt be fontos szerepet. Ha azonban az EXorok nem mutatnak semmilyen megkülönböztető vonást, az azt jelzi, hogy az EXorok nem kivételes objektumok a fiatal források között. Ebben az esetben eruptív időszakok jelen lehetnek minden Nap-típusú csillag korai fejlődésében, és fontos általános jelentőséggel bírnak a kis tömegű csillagok és bolygók születési folyamatában. A kérdés tisztázásának érdekében megvizsgáltam, hogy az EXorok prototípusa, az EX Lupi vajon mennyire különleges a „normális” T Tauri csillagok között. A központi csillagot körülvevő korong szerkezetének tulajdonságaira helyeztem a hangsúlyt, a csillag körüli környezetet hasonlítottam össze a klasszikus T Tauri csillagok környezetével.

Tanulmányoztam a kitörésben levő források környezetét is. A kitörések hatással vannak magukra a csillagokra, a közvetlen környezetükre és így áttételesen az ott

kialakuló bolygórendszerekre is. A csillag fényes állapotában a megnövekedett anyagbehullás során felszabaduló energia felmelegíti a teljes rendszert, a megnövekedett akkréciót erőteljes szelek és kifúvások kísérik. Ezek az események módosítják a rendszer sűrűség- és hőmérsékleteloszlását, és a korong valamint a burok porösszetételét hetes-hónapos időskálán. Ezeknek a változásoknak a tanulmányozása adta dolgozatom másik témáját. Az EX Lupi legutóbbi, 2008-as kitörése során közvetlen meg tudtuk figyelni az amorf por kristályosodását, és ehhez az eredményhez kapcsolódóan megvizsgáltam, hogy a csillag körüli korong mely területén alkalmasak a hőmérsékleti feltételek a kristályok keletkezéséhez. Radiatív transzfer modellek segítségével követtem a V1647 Ori 2003–2006-os kitörésének időbeli fejlődését több időpontból származó méréseken keresztül. Kíváncsi voltam, hogy a megfigyelt időbeli változások vajon a rendszer központi részének változó megvilágításából erednek, vagy a korong – burok rendszer strukturális változásai okozzák.

Módszerek

Az eruptív csillagok közvetlen környezetének tanulmányozásához összeállítottam a források nyugalmi és/vagy kitöréskorbeli spektrális energiaeloszlását (SED). A SED-ekhez az optikai-távolsági-infravörös hullámhossztartományban földi és űreszközökkel mért adatokat használtam. A mérések egy része az irodalomból származott, egy része új megfigyelésekből. A V1647 Ori vizsgálatánál két időpontból származó interferometria mérések tettek lehetővé alaposabb elemzést, melyeket több időpontban mért SED-ekkel egészítettem ki.

A források természetét azonban az észlelések alapján nehéz feltérképezni. A korongok és burkok tulajdonságainak jellemzéséhez ezért a jelenlegi elméleti elképzeléseknek megfelelő szimulációkkal vettem össze a megfigyeléseket. Erre a célra kifinomult radiatívtranszfer-kódok állnak rendelkezésre. Munkám során két kontinuum radiatívtranszfer-kódot használtam a források analíziséhez: a *RADMC*-t (Dullemond & Dominik, 2004) és az *MC3D*-t (Wolf et al. 1999, Wolf 2002). A modellezés során párhuzamosan illesztettem meg a rendelkezésre álló optikai-távolsági-infravörös kontinuum méréseket, melyek a V1647 Ori esetében közép-infravörös interferometriai vizibilitásgörbékkel egészültek ki, hogy a vizsgált forrásokról részletes, kvantitatív fizikai

képet nyerjek. Mindkét kód a Monte Carlo módszert és a Bjorkmann-Wood algoritmust használja a sugárzásitranszfer-probléma megoldására. Képesek kezelni akár bonyolult többdimenziós sűrűségeloszlásokat és az akkréciót is. A dolgozatomban bemutatott mindkét forrás esetén kétdimenziós hengersizmetrikus sűrűségeloszlást feltételeztem, mely egy csillagkörüli korongból és a V1647 Ori esetén az azt körülvevő burokból állt. A spektrumokat és képeket a sugárzásitranszfer-számítások eredményeképp kialakuló modell-hőmérsékleteloszlásból számoltam ki, majd a kapott eredményeket összevetettem a mérésekkel. A legjobban illeszkedő modell paramétereit alapján jellemzést adtam a rendszerről, és következtetéseket vontam le az adott konfigurációt létrehozó folyamatokról.

Tézisek

Az EX Lupi nyugalomban

(Sipos et al., 2009, *A&A*, 507, 881)

- (1) Megvizsgáltam a forrás irodalmi adatok alapján összeállított optikai–infravörös nyugalmi SED-jének jellemzőit, majd összehasonlítottam más nem eruptív fiatal csillagok SED-jével. Eredményeim a következők:
 - (a) Nyugalomban az optikai–infravörös hullámhossztartományban a forrás 25%-nál kisebb változékonyságot mutat.
 - (b) A SED alakja hasonló a klasszikus T Taurikéhoz, azonban $7\,\mu\text{m}$ felett ~ 2.5 -szer magasabb fluxust bocsát ki, mint a taurusbeli középérték. A rövidebb és hosszabb hullámhosszúságú sugárzás aránya megkülönbözteti az EX Lupit a T Tauri csillagok nagy részétől.
- (2) A forrás részletes modellezése során a SED-et egy enyhén trapéz profilú $0.025\,M_{\odot}$ tömegű 0.2 cs.e. belső és 150 cs.e. külső sugarú koronggal sikerült illesztenem. Megállapítottam, hogy az EX Lup csillagkörüli korongját leíró paraméterek tipikusnak mondhatók a klasszikus T Tauri csillagok között. A korong belső sugara azonban a szublimációs határ által indokoltnál ~ 3.5 -szor kijjebb található.

- (3) Megállapítottam, hogy az EX Lupit körülvevő nagy pormentes belső lyuk olyan folyamat jelenlétére utal mely elkezdte a korongot szétesztatni. Ez a tulajdonság olyan T Tauri korongokra jellemző, melyek fejlődésüknek már egy előrehaladott állapotában találhatók. Ezeket a korongokat rendszerint a „fejlett” vagy „átmeneti” osztályba soroljuk, és különféle tömegű és korú T Tauri csillagok körül egyaránt megtalálhatóak. Ez alapján megállapítottam, hogy az EX Lupi az átmeneti korongfejlődési időszak kezdeti szakaszában lehet. A belső lyuk jelenlétét azonban több folyamat is okozhatja, kapcsolatban lehet a kitöréssel, lehet kettősség vagy a fotoevaporáció eredménye, vagy okozhatja a mágneses tér is.

Az EX Lupi kitörésben

(Ábrahám et al. 2009, *Nature*, 459, 224; Juhász et al. 2012, *ApJ*, 744, 118)

- (4) A rendszer nyugalmi és kitörésbeli hőmérsékleteloszlásának összehasonlításakor azt találtam, hogy a kitörés során keletkezett kristályos porszemcséket egy 900 K feletti hőmérséklettartományban aktiválódó folyamat hozta létre. A hőmérsékleteloszlások alapján megállapítottam, hogy a csillagköri korongban a hevítés során keletkező kristályok a csillagköri korong felszíni rétegeiben, a csillagtól legfeljebb ~ 0.5 cs.e. távolságra képződhettek, mivel a hőmérséklet csak itt lépi át az amorf porszemcsék hevítéses kristályosodásához szükséges küszöbértéket. A középsőkban a hőmérséklet mindig túl alacsony volt a kristályosodáshoz. Nyugalomban a teljes korong túl hideg volt a kristályképződéshez.

Dinamikai változások egy kitörés során

A V1647 Ori fiatal eruptív csillag VLTI mérései

(Mosoni et al. 2012, submitted to *A&A*)

- (5) Részletesen modelleztem a V1647 Ori csillagköri környezetét a SED és az interferometriai vizibilitásgörbe felhasználásával. Ennek alapján leírást adtam a fiatal csillag környezetéről, mely egy korongból és egy burokból áll, és hasonló paraméterekkel jellemezhető más beágyazott források körül megfigyeltékhez. Ez az eredmény alátámasztja

azt a feltételezést, hogy az eruptív viselkedés nem különleges források sajátja, hanem a kis tömegű csillagképződés egy fontos fázisát kísérő jelenség.

- (6) Összehasonlítottam a V1647 Ori optikai–infravörös SED-jét négy különböző időpontban a 2003–2006-os kitörés alatt és nyugalomban. Következtetésem az alábbiak.
- (a) A csillagkörüli korongról a csillagra az anyagbehullás üteme a kitörés csúcán volt a legmagasabb ($7 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$), majd fokozatosan csökkent a kitörés előrehaladtával. Nyugalomban, a kitörés csúcánál kapott érték $\sim 4\text{--}5\%$ -ára lassult az anyagbehullás, de az akkréció még ekkor is erősnek számított ($3 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$) a nyugalmi állapotban levő fiatal csillagok között.
- (b) A csillagot körülvevő porkorong es -burok belső sugara is változott a rendszer nyugalmi és kitörésbeli állapota között. Ez a változás valamilyen dinamikai folyamatra utal, mely a kitörés kezdete után gyorsan, néhány hónap alatt kijebb tolt a poros környezet belső sugarát 0.5 cs.e. -ről 0.7 cs.e. -re. A geometriai átrendeződés hatására a rendszerben az extinkció $A_{\text{IC}} = 2.6 \text{ mag}$ -val csökkent, mely arra utal, hogy a csillag fényesedéséhez az akkréciós ráta növekedése és az extinkció változása egyaránt hozzájárult.
- (7) A 2005 márciusi és szeptemberi nagy szögfelbontású méréseket is figyelembe véve megállapítottam, hogy forrás a második időpontban felbontottabbnak látszott. Ezt két lehetséges okkal magyaráztam. Egyik, hogy a két interferometria-mérés időpontja között átrendeződött a csillag közvetlen környezete, és a burok belső része 3 cs.e. -en belül kitisztult, vagy a kitörést kísérő szél illetve kifúvás hatására, vagy a csillag körül jelen levő meleg halo eltűnése miatt. A másik, hogy nem egyensúlyi helyzetet figyelhattunk meg 2005 szeptemberében, amikor a forrás gyors elhalványodását az optikailag vastag csillagkörüli anyag nem tudta azonnal követni.

Megjegyzés: Ennek a kitörésnek a vizsgálatát doktori dolgozatában tárgyalta Kóspál Ágnes, valamint akadémiai doktori disszertációjában Ábrahám Péter is. Itt azonban a kitörést teljesen más módszerekkel és más szempontok szerint vizsgáltam, így eredményeim az ő eredményeiktől függetlenek.

Következtetések

Dolgozatommal hozzájárultam a fiatal eruptív csillagok alaposabb megismeréséhez. Mind az EX Lupival, mind a V1647 Ori-val kapcsolatos eredményeim arra utalnak, hogy az eruptív fiatal csillagok valószínűleg nem a kis tömegű csillagok egy különleges fejlődési utat bejáró alcsoportját alkotják, hanem a csillagkeletkezés egy olyan fázisának képviselői, melyen a Nap-típusú csillagok jelentős része keresztülmegy. Az EX Lupi nyugalmi modellezése során talált belső pormentes lyuk meglepő eredmény volt. Arra utal, hogy a forrás a korongfejlődés egy az eddig véltnél későbbi szakaszában tart, hisz az ehhez hasonló belső lyukak a klasszikus T Tauri állapot végén található objektumokra jellemzők. A lyuk kiürüléséhez vezető folyamat még tisztázásra vár, további kutatásoknak adhat témát. Az EX Lupit érdemes lenne összehasonlítani más EX-orokkal is az infravörös hullámhossztartományban. Kideríthetnénk, mennyire jellemző az EX-orok poros környezetében egy ilyen jellegű belső lyuk, és hogy van-e valamilyen kapcsolat a kitörések és a pormentes belső övezet jelenléte között, valamint azt is megtudhatnánk, vajon mennyire szokványos képviselője az EX Lup az eruptív csillagoknak.

Két kitörés példáján keresztül szemléltettem, hogy a központi csillag közvetlen környezetében a kitörés megváltoztatja a rendszer tulajdonságait. A hőmérséklet növekszik a csillagot körülvevő anyagban, mely az EX Lup korongjában kristályosodáshoz vezetett, a V1647 Ori esetében pedig a porkorong és burok belső peremét kifelé mozgatta. A V1647 Ori esetében megmutattam, hogy a forrás kifényesedését az akkrécio erősödésének és a fényelnyelés növekedésének együttese okozza.

Eredményeim demonstrálták az alkalmazott módszerek hasznosságát. A fiatal eruptív csillagok környezetének részletes tanulmányozásához fontos, sőt olykor elengedhetetlen eszköz az adatok értelmezését segítő modellezés, mely lehetőséget nyújt arra, hogy kvantitatív jellemzést adjunk a vizsgált objektumokról. A források változékonysága miatt a mérések egyidejűsége kulcsfontosságúnak bizonyult. A nagy szögfelbontású interferometriai mérések a V1647 Ori esetében olyan folyamatok jelenlétét jelezték a forrás legbelső területein, melyekre csupán a SED vizsgálata alapján nem találtam semmi utalást. A használt statikus, sugárzási egyensúlyt feltételező kódok határaival is szembe kellett néznem, a kitörések során fellépő nemegyensúlyi állapotok csak olyan dinamikai mod-

ellekkel lennének jól leírhatók, melyek ma még nem állnak rendelkezésünkre. Azonban a jelenlegi kódok is még sok lehetőséget rejtene, más kitöréseket is érdemes hasonló módszerekkel tanulmányozni. Bár egyre több információval rendelkezünk az eruptív fiatal csillagokról, még távol vagyunk attól, hogy teljes, átfogó képünk legyen róluk. A több időpontban, több hullámhosszon végzett méréseket nagy szögfelfelbontású észlelésekkel kiegészítve, majd azokat részletes modellekkel megillesztve tovább mélyíthetjük tudásunkat a FUor/EXor kitörésekről.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

Ábrahám, P., Juhász, A., Dullemond, C. P., Kóspál, Á., van Boekel, R., Bouwman, J., Henning, T., Moór, A., Mosoni, L., Sicilia-Aguilar, A., & **Sipos, N.** (2009). Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star. *Nature*, *459*, 224–226.

Juhász, A., Dullemond, C. P., van Boekel, R., Bouwman, J., Ábrahám, P., Acosta-Pulido, J. A., Henning, T., Kóspál, A., Sicilia-Aguilar, A., Jones, A., Moór, A., Mosoni, L., Regály, Z., Szokoly, G., & **Sipos, N.** (2012). The 2008 Outburst of EX Lup – Silicate Crystals in Motion. *ApJ*, *744*, 118.

Mosoni, L., **Sipos, N.**, Ábrahám, P., Moór, A., Kóspál, A., Henning, T., Juhász, A., Kun, M., Leinert, C., Quanz, S., Ratzka, T., Schegerer, A., van Boekel, R., & Wolf, S. (2012). Dynamics during outburst: VLTI observations of the young eruptive star V1647 Ori during its 2003–2006 outburst. *A&A*, *submitted*.

Sipos, N., Ábrahám, P., Acosta-Pulido, J., Juhász, A., Kóspál, Á., Kun, M., Moór, A., & Setiawan, J. (2009). EX Lupi in quiescence. *A&A*, *507*, 881–889.